

Для стабілізації змін коефіцієнту витрати потрібно змінювати гідравлічний діаметр, і як наслідок швидкість потоку робочої рідини, що потребує відповідних досліджень структури течії робочої рідини.

Експериментальні дослідження дозволили встановити, що температура робочої рідини суттєво впливає на характеристики дросельного тракту. Результатом нагріву є зменшення в'язкості робочої рідини, що приводить до збільшення числа  $Re$  та відповідно коефіцієнта витрати. Отримані експериментальні данні були апроксимовані для можливості використання в математичній моделі регульованого гідродинамічного кавітаційного генератора і дозволили забезпечити врахування властивостей робочої рідини. Відсутність оплавлення гострої вхідної кромки моделі дроселя, виконаної з органічного скла, свідчать про можливість реалізації кавітаційно стійкого сопла (напрацювання понад 20 годин). При всіх режимах роботи кавітаційний струмінь (факел) знаходиться на відстані від 1...5 мм (кавітація відбувалася не в соплі, що також підвищує ресурс насадку).

#### Список літератури

1. Маргулис, М. А. *Звукохимические реакции и сонолюминесценция [Текст] : научное издание / М. А. Маргулис. - М. : Химия, 1986. - 288 с.*
2. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: ... Київ, НТУУ "КПІ".
3. Томашевский А.О. Экспериментальное исследование гидродинамической кавитации /Томашевский А.О., Ночниченко И.В. // II Международная научно техническая конференция «Гидро-и пневмоприводы машин» – Винница, 2016 – С. 203-205.
4. Ночниченко І.В. Експериментальне дослідження гідролюмінісценції у кавітуючому потоці мінерального мастила Ночниченко І.В., Сідлецький В.О., Томашевський А.О. // II Міжнародна науково-технічна конференція «Гідро-та пневмоприводы машин» – Вінниця, 2016 – С. 200-202.

**УДК 678.057.3:532.55**

**Коваль А.Д., Козерацький М.С., Мазуркевич К.Ф.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

### **ВПЛИВ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ РІДИН НА ПРОЦЕС ЇХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РОЗПИЛЕННЯ**

Відомі способи розпилення рідини які використовуються на практиці можна поділити на гідравлічний, пневматичний, механічний, електростатичний, пульсаційний та акустичний [1-3].

При гідравлічному способі розпилення вдається отримати аерозоль з дисперсністю від 10 до 2600 мкм. Перевагами гідравлічного способу розпилення можна вважати достатньо високий ККД (2-4 кВт на диспергування 1 т рідини), відносну простоту виготовлення та можливість отримання достатньо малої продуктивності.

Дисперсність аерозолю при пневматичному способі розпилення має дуже широкий діапазон і лежить в межах 100...2000 мкм. Розмір крапель аерозолю в основному залежить від відносної швидкості потоку газу[1,3]. Головним недоліком пневматичного способу розпилення є необхідність застосування додаткового робочого тіла та обладнання для його стиснення. До недоліків варто також віднести дуже низький ККД цього способу отримання аерозолю (50-60 кВт на 1 т рідини).

При механічному способі розпилення можна отримати аерозоль з дисперсністю 50...150 мкм. Деякі механічні розпилювачі дозволяють змінювати продуктивність в широкому інтервалі від 0,1 до 1000 л/год без зміни якості розпилю.

При електростатичному способі розпилення під дією електричного поля можна отримати дисперсність аерозолю від 140 до 420 мкм.

Дисперсність аерозолі при пульсаційному способі розпилення лежить у межах 30...100 мкм.

Акустичний спосіб розпилення дає можливість отримати аерозоль за рахунок накладання або введення в рідину акустичних коливань звукового або ультразвукового діапазону. Цей спосіб розпилення використовують для отримання аерозолі дисперсністю 50...600 мкм при значній продуктивності (до 6000 л/год).

У випадку підведення ультразвукових коливань з боку рідини можливе розпилення в фонтані та в тонкому шарі. Розпилення рідини у фонтані здійснюється за рахунок введення в рідину високочастотних (1...3 МГц) ультразвукових коливань, що дозволяє отримати дисперсність у діапазоні 0,5...5 мкм. При такому способі продуктивність розпилення води лежить в межах 0,001...0,05 л/хв.

Розпилення рідини в тонкому шарі відбувається за рахунок введення ультразвукових коливань в тонкий шар рідини, що призводить до виникнення, так званого, кавітаційно-хвильового механізму розпилення за допомогою спеціальних ультразвукових диспергаторів.

При цьому способі розпилення отримується аерозоль з дисперсністю в межах 5...30 мкм. Продуктивність при вказаному способі розпилення лежить в межах 0,05...2,5 л/хв.

Підвищення рівня акустичної енергії, що вводиться в рідину до деякого значення, призводить до експоненціального збільшення амплітуди капілярно-гравітаційних хвиль і втрати ними стійкості. З гребеня хвилі, яка втрачає стійкість, зривається крапля аерозолі та починається, так зване, хвильове розпилення. Основними параметрами, які описують цей процес є амплітуда та частота коливань.

Граничне значення амплітуди коливань віброуючої поверхні диспергатора, при якому відбувається перехід капілярно-гравітаційних хвиль в нестійкий стан, виражається залежністю [1, 2]

$$A_{\Pi} = \frac{\delta \lambda_{\kappa}}{2\pi^2 f},$$

де  $\lambda_{\kappa}$  - довжина капілярних хвиль,  $f$  - частота ультразвукових коливань.

Декремент затухання може бути визначений за допомогою наступних залежностей

$$\delta = 2 \frac{\eta}{\rho} \left( \frac{2\pi}{\lambda_{\kappa}} \right)^2, \quad \text{або} \quad \delta = \delta_0 \left( 1 + \kappa_i \frac{a^2}{\lambda_{\kappa}^2} \right)$$

де  $\delta_0$  - член, який не залежить від амплітуди капілярних хвиль;  $\kappa_i$  - коефіцієнт, який залежить від частоти, температури і реологічних властивостей рідини, що знаходиться на віброуючій поверхні диспергатора,  $\eta$  - в'язкість рідини.

Довжина капілярних хвиль визначається наступним чином

$$\lambda_{\kappa} = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}},$$

де  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу рідини;  $\rho$  - густина рідини.

Експериментальні та теоретичні дослідження [3-5] свідчать, що залежно від реологічних властивостей рідини і умов збудження ультразвукових коливань необхідна для початку процесу хвильового розпилення амплітуда коливань віброуючої поверхні в кілька разів перевищує розрахункове порогове значення амплітуди.

Наприклад, у роботі В.М.Хмельова [4] наводиться математична модель низькочастотного кавітаційного розпилення в'язких рідин. Автор вважає, що динаміку кавітаційної бульбашки можна описати рівнянням Кірквуда-Бете, тобто диференціальним рівнянням залежності радіуса кавітаційної бульбашки від часу

$$R \left(1 - \frac{R}{C}\right) \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{R}{3C}\right) \left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^2 = \left(1 + \frac{R}{C}\right) H + \frac{R}{C} \left(1 - \frac{R}{C}\right) \frac{\partial H}{\partial t},$$

де  $C$  — локальна швидкість звуку в рідині,  $H$  — ентальпія рідини,  $R$  — радіус бульбашки.

Ентальпію рідини автор [4] пропонує визначати з урахуванням отриманого виразу для амплітуди звукового тиску, зробивши припущення, що тиск і густина рідини пов'язані між собою рівнянням стану

$$H = \frac{n}{n-1} \frac{(p_0 + B)^{\frac{1}{n}}}{\rho_0} \left[ \left( p_0 - \rho_0 \omega^2 A h \sin(\omega t) + B \right)^{\frac{n-1}{n}} - \left( p_{r0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{\partial R}{\partial t} + p_n + B \right)^{\frac{n-1}{n}} \right],$$

де  $n$ ,  $B$  — параметри рівноважного стану рідини,  $p_0$  — рівноважний тиск рідини,  $p_{r0}$  — рівноважний тиск газу,  $R_0$  — початковий радіус кавітаційної бульбашки,  $R$  — дійсний радіус кавітаційної бульбашки,  $\mu$  — коефіцієнт динамічної в'язкості рідини,  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу рідини;  $\rho$  - густина рідини.

На рис.1 наведено результат математичного моделювання залежності довжини капілярної хвилі від в'язкості рідини при різних частотах акустичних коливань. Автор вважає, що «порогова в'язкість» при частоті 22кГц, при якій розпил вже не має відбуватися, складає 0,02 Па·с. [4].

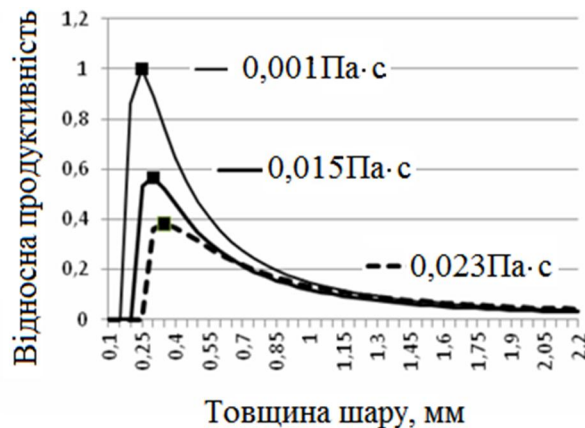


Рис.1 – Результат математичного моделювання залежності відносної продуктивності від товщини шару рідини при різних значеннях в'язкості [4]

У деякі розрахункові формули входить в'язкість рідини, але на жаль в літературних джерелах недостатньо інформації про вплив в'язкості на процес розпилення, дисперсність або продуктивність. Більшість дослідників проводили експериментальні дослідження з рідинами які мали малу в'язкість.

В якості модельних рідин нами обрано гідравлічні та автомобільні оливи. Було зроблено припущення, що «в'язкість розпилення»  $\mu \approx 0,005$  Па·с можна вважати особливістю обраного для досліджень диспергатора [6-7].

В наших експериментах ми забезпечили товщину шару  $h=0,8$ мм. Об'єм рідини для цього випадку становив 1 мл. Такий об'єм забезпечить умову розпилювання в тонкому шарі. Частота коливань складала 22 кГц.

Попередні експерименти з розпилювання гліцерину і води, а також водних розчинів гліцерину з різною концентрацією показали, що розпилення відбувалось при різних температурах, однак коефіцієнти динамічної в'язкості сумішей за цієї температури мають близькі значення ( $\mu \approx 0,005$  Па·с) [6].

Так, як у якості теплоносія у термостаті використовувалась вода, нагрівати оливу вище за 100°C не було можливості. В'язкість рідин ми визначали за графіком, продовжуючи його

до точки перетину з прямою  $\mu \approx 0,005 \text{ Па} \cdot \text{с}$ . На рис.2 наведено результати експериментального визначення «прогнозованих» температур розпилювання для олив, які були в подальшому розпилені на ультразвуковому розпилювачі після нагрівання у відкритому тиглі.

Слід зазначити, що для розпилення рідини необхідно було нагріти рідину на температуру більшу за «температуру розпилення»

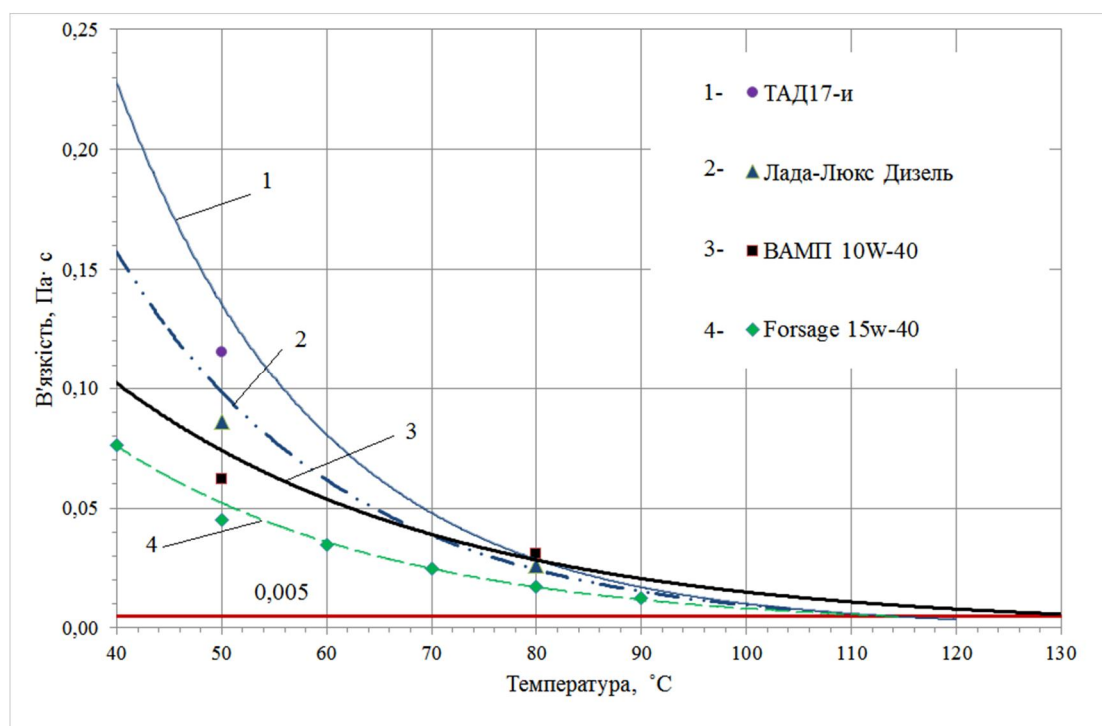
$$T_{\text{нагрів}} = T_{\text{прогноз}} + T_{\text{перем}} + T_{\text{охолод}},$$

де  $T_{\text{нагрів}}$  – температура до якої треба нагріти рідину,  $T_{\text{прогноз}}$  – температура, за якої рідина має коефіцієнт динамічної в'язкості  $0,005 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $T_{\text{перем}}$  – зниження температури при переміщенні з зони нагріву до зони розпилення,  $T_{\text{охолод}}$  – температура, яка втрачається на часткове нагрівання розпилювача.

В подальшому ми використовували поняття «температура нагріву», яку ми визначали розрахунковим шляхом, та потім корегували за результатами експериментів.

Експериментально встановлено, що за час перенесення до зони розпилення (приблизно 5 сек) олива ТАД-17 (об'єм 1 мл), охолонує приблизно на  $3^\circ\text{C}$ .

На часткове нагрівання диспергатора втрачалось приблизно  $30\text{-}35^\circ\text{C}$ , залежно від швидкості створення тонкого шару на поверхні.



**Рис.2 - Графік для визначення «прогнозованої» температури розпилення олив: 1-ТАД-17; 2-Лада-Люкс (Дизель); ВМП 10W-40; 4-Forsage 15W-40**

Наприклад, попередні експерименти показали, якщо нагрівати оливу I-20 за допомогою ультразвукового диспергатора, розпилення відбувалось за  $T_{\text{розпил}}=95^\circ\text{C}$ . «Прогнозована температура» розпилення, яка визначалась за допомогою графіка залежності в'язкості від температури також становила  $T_{\text{розпил}}=95^\circ\text{C}$ . При цьому стабільне розпилення оливи I-20 відбувалось за «температури нагрівання»  $T_{\text{нагрів}}=135^\circ\text{C}$ .

Таким чином, ми довели, що попередній нагрів обраних нами, в якості модельних, олив до температури, яка забезпечує в'язкість  $\mu=0,005 \text{ Па} \cdot \text{с}$  приводить до їх розпилення на УЗ розпилювачі, який ми використовували в наших експериментах.

### Список використаних джерел

1. *Ляшок А.В.* Пристрої ультразвукового розпилення рідини в системах мехатроніки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 / Ляшок Аліна Вікторівна ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - Київ, 2014. - 20, [1] с. : рис.
2. *Луговський О.Ф.* Спосіб та пристрої для отримання рідинного аерозоллю / О.Ф. Луговський, А.В. Ляшок, Ю.О. Пижигов // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – Київ, 2011. – № 61 том 1. – С. 107 – 113.
3. *Хмелєв, В. Н.* Ультразвуковое распыление жидкостей / В. Н. Хмелёв, А. В. Шалунов, А. В. Шалунова – Барнаул АлтГТУ, 2010. – 272 с.
4. *В. Н. Хмелёв, А. В. Шалунов, Р. Н. Гольх, А. В. Шалунова /* Выявление оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия для распыления вязких жидкостей / Электронный журнал «Техническая акустика» <http://www.ejta.org> 2011, 10
5. *Розенберг, Л. Д.* Физика и техника мощного ультразвука. В 3 т. Т. 3: Физические основы ультразвуковой технологии / Под редакцией Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 270 с.
6. *Коваль О.Д., Бойко Ю.О.* /Вивчення впливу властивостей рідини з метою вибору раціональних режимів їх ультразвукового розпилення/Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", Київ, 26 - 29 травня 2015 р.: Матеріали конференції -Київ: 2015.- С.66.
7. *Коваль О.Д., Козерацький М.С., Мазуркевич К.О.*/ Вивчення впливу реологічних властивостей рідин з метою вибору раціональних режимів їх ультразвукового розпилення/ Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", Київ, 24 - 27 травня 2016 р.: Матеріали конференції -Київ: 2016.- С. 76-79.

### Мартинцев В.С., аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури, м.Київ

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ КАВІТАЦІЙНОГО ЗМІШУВАЧА СТАТИЧНОГО ТИПУ ЗАЛЕЖНО ВІД ЙОГО ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Практичний інтерес викликають кавітаційні гідродинамічні пристрої статичного типу, в яких у потоці оброблюваної рідини утворюється локальне просторове зниження тиску, і утворюється гідродинамічна кавітація за рахунок зміни геометрії течії рідини. Енергія для збудження кавітації у цьому випадку підводиться безпосередньо технологічним потоком рідини.

З метою розширення практичного використання гідродинамічних кавітаційних пристроїв було проведено аналіз впливу гідродинамічних факторів, що впливають на ефективність кавітаційного оброблення у пристрої статичного типу. Завдяки зміні конструктивних елементів робочої камери досягається зміна геометрії течії оброблюваного середовища.

Особливості гідродинаміки, що визначають структуру потоку в кожному конкретному випадку, залежать від типу змішувача, його конструктивного виконання і властивостей оброблюваного середовища. Загальним гідродинамічним параметром для пристроїв всіх типів, що використовують для оцінки границі зміни ділянки їхньої роботи є відцентровий критерій Рейнольдса  $Re_{\omega}$ .

Провівши аналіз експериментальних даних було отримано найбільш оптимальні режими роботи кавітаційного змішувача статичного типу і виявлено, що зі зростанням критерію Рейнольдса ефективність оброблення середовища покращується. Розроблена методика розрахунку кавітаційного змішувача статичного типу.